

Mika Vaheri

ROBOTIIKAN HYÖDYNTÄMINEN RAKENNUSTYÖMAALLA

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Kandidaatintyö
Tammikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Mika Vaheri: Robotiikan hyödyntäminen rakennustyömaalla (Utilization of robotics at construction site)

Kandidaatintyö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan tekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Tammikuu 2020

Robotit ovat olleet jo vuosikymmeniä apuna varsinkin tehdastuotannossa, mutta rakennustyömailla niitä ei olla vielä juurikaan nähty. Tutkimuksessa selvitettiin rakentamisrobotiikan hyödyntämistä rakennustyömailla niin Suomessa kuin maailmalla sekä minkälaisia työtehtäviä robotit saattavat tulevaisuudessa tehdä ihmisten puolesta. Työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena ja materiaaleina käytettiin aihetta koskevia kirjoja, tutkimusraportteja sekä uutisartikkeleita.

Rakentamisrobotiikkaa ei ole käytössä Suomessa käytännössä ollenkaan. Suomessa on testattu robotti-imurin käyttöä työmaalla sekä betonielementtien 3D-tulostusta laboratorio-olosuhteissa. Kuitenkaan kumpikaan näistä ei ole vielä valmis jatkuvaan työmaakäyttöön.

Ympäri maailmaa on käytössä paljon erilaista rakentamisrobotiikkaa, mutta niistäkään mikään ei ole yleistynyt vielä maailmanlaajuisesti. Rakentamisrobotteja käytetään usein toistuvissa yksinkertaisissa töissä. Robotteja on kehitetty hitsaustöihin, rakenteiden 3D-tulostamiseen, työmaan valvontaan, muuraustöihin, paloeristämiseen, raudoittamiseen, tavaroiden kuljettamiseen, paneelien asentamiseen, julkisivun maalaukseen sekä eri betonitöihin, kuten betonin levitykseen, tasoitukseen sekä hiertämiseen. Osa näistä roboteista tulee vielä tulevaisuudessa yleistymään rakennustyömailla ympäri maailmaa.

Rakentamisrobotiikan nousua on odotettu jo vuosikymmeniä, eikä sen läpimurrosta ole vieläkään tietoa. Teknologian halventuessa myös rakentamisrobotteja on kannattavampaa ottaa normaalin työn lomassa käytettäväksi, ja ne tulevat yleistymään varsinkin korkean hintatason maissa tulevana vuosina.

Avainsanat: Rakentamisrobotiikka, rakennusrobotiikka

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ROBOTIIKKA	2
2.1 Robotin määritelmä	2
2.2 Rakentamisrobotiikan historia	3
2.3 Rakentamisrobotiikan haasteita	5
3. RAKENTAMISROBOTIIKAN NYKYTILA	7
3.1 Rakentamisrobotiikka Suomessa	7
3.1.1 Robotti-imuri Pulu M	7
3.1.2 Elementtirobotti RoboCatt	9
3.2 Rakentamisrobotiikka maailmalla	10
3.2.1 Hitsausrobotit	10
3.2.2 Muurausrobotit SAM100 ja Hadrian X	11
3.2.3 Rakenteiden 3D-tulostus	13
3.2.4 Valvontarobotti SpotWalk	15
3.2.5 Paloeristeen ruiskutusrobotit	17
3.2.6 Raudoitusrobotti	18
3.2.7 Betonin levitys-, tasoitus- ja hierontrobotit	18
3.2.8 Kuljetusrobotti Robo-Carrier	19
3.2.9 Alakattopaneelien asennusrobotti Robo-Buddy	20
3.2.10 Maansiirtorobotiikka	21
3.2.11 Julkisivun maalausrobotit	23
4. RAKENTAMISROBOTIIKAN TULEVAISUUS	24
4.1 Seuraavat robotisoinnin kohteet	24
4.2 Rakentamisrobotiikan kehitys	25
5. YHTEENVETO	26
LÄHTEET	28

1. JOHDANTO

Rakennusteollisuuden yksi suurimmista kulueristä on työntekijöiden palkkakustannukset. Ihminen on tuotantoketjun kriittinen jäsen, mutta useat työvaiheet voitaisiin suorittaa roboteilla. Voisivatko silloin työmaan kustannukset laskea ja työturvallisuus sekä tehokkuus parantua? Robotit ovat jo vuosikymmenten ajan korvanneet ihmisen tietyissä työtehtävissä muualla teollisuudessa, mutta rakennusteollisuus on jäänyt vuosikymmeniä jälkeen. Tutkimuksessa tutkitaan rakennustyömailla käytössä olevaa robotiikkaa ja sen vaikutusta rakennusteollisuuteen. Tutkimuksessa tarkastellaan tekniikan ja sovelluksien nykytilaa sekä tulevaisuuden potentiaalisimpia robotisointikohteita työmaalla.

Tutkimukseen on poimittu mielestäni edistyneimmät ja tulevaisuudessa mahdollisesti yleisimmässä käytössä olevat rakentamisrobotit. Tavoitteena on tuoda esille tällä hetkellä rakennustyömailla toimivien robottien sekä sovellusten toimintaperiaatteita sekä hyötyjä ja haittoja. Aihe rajautuu talonrakennustyömaalla hyödynnettäviin rakentamisrobotteihin. Tutkimuksessa ei käsitellä infrakohteissa kuten tie-, silta- ja tunnelitoissa käytettäviä rakentamisrobotteja.

Tutkimuskysymyksenä toimii ”Miten robotiikkaa hyödynnetään rakennustyömailla Suomessa ja maailmalla?” ja tämä jakautuu alakysymyksiin ”Missä työläjeissa ja töissä robotteja käytetään rakentamisessa” sekä ”Mitkä ovat rakentamisen potentiaalisimmat robotisointikohteet lähivuosina?”

Tutkimuksen toisessa luvussa selvitetään robotiikan määritelmiä, rakentamisrobotiikan historiaa sekä minkä takia rakentamisrobotiikan kehitys on ollut niin haastavaa. Kolmannessa luvussa käsitellään rakentamisrobotiikan nykytilaa Suomessa ja maailmalla. Siinä esitellään kaksi suomalaista sekä useita rakentamisrobotteja eri puolilta maailmaa, joita käytetään tai on testattu onnistuneesti työmailla. Neljännessä luvussa pohditaan rakentamisrobotiikan tulevaisuutta. Viides luku kokoaa yhteen tutkimuksen havainnot ja niistä aiheutuneet johtopäätökset.

2. ROBOTIIKKA

2.1 Robotin määritelmä

Mielikuvat roboteista ovat usein ihmistä muistuttavia koneita (kuva 1), jotka kykenevät automaattisesti suorittamaan niiltä vaaditut tehtävät, tai tehtaissa liukuhihnoilla työskentelevät robottikädet. Robotin määritelmiä onkin monenlaisia. Sana ”robotti” tulee tšekin kielen sanasta ”robota”, joka tarkoittaa pakkotyötä. Sanaa käytettiin ensimmäistä kertaa 1920-luvun tšekkiläisessä näytelmässä kuvaamaan kuvitteellista humanoidia. Robotti on kone, joka kykenee liikkumaan itsenäisesti esimerkiksi kävelemällä tai pyörittämällä pyöriä tai suorittamaan monimutkaisia toimia kuten tarttumaan tai liikuttamaan esineitä. Robotti kykenee usein suorittamaan automaattisesti toistuvia tehtäviä esimerkiksi tehtaan kokoonpanolinjastolla. (Merriam-Webster Dictionary 2019)

Robotti on älykäs keinotekoinen olento, joka on tyypillisesti valmistettu metallista ja joka muistuttaa usein jollain tavalla ihmistä tai eläintä. Se on usein ohjelmoitavissa tekemään useita eri tehtäviä, mutta yleensä erikoistunut vain muutamaan eri tehtävään. Robotiksi voi kutsua myös ohjelmistoa, joka kykenee automaattisesti suorittamaan sille annetun tehtävän. Esimerkiksi internet hakukone, joka yhdistää verkkosivujen sisältöä ja suhteita toisiinsa. (Oxford English Dictionary 2019)



Kuva 1. Ihmistä muistuttava robotti (Alasaari & Nykänen 2017)

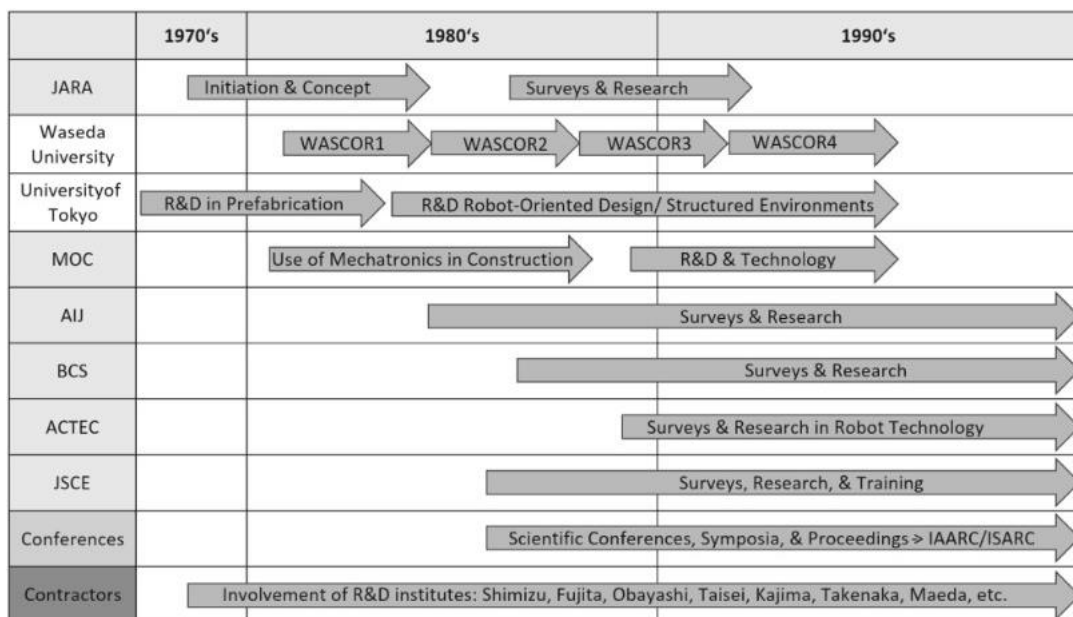
Rakentamisrobotiikka on robotiikkaa, joka toimii rakennustyömailla erilaisissa rakennustöitä avustavissa tehtävissä tai itse rakennustöissä. Rakentamisroboteilla

voidaan joko pyrkiä nopeuttamaan työntekoa tai tekemään töitä sellaisissa ympäristöissä, jossa ihminen vaarantuisi tai ei kykenisi työskentelemään.

2.2 Rakentamisrobotiikan historia

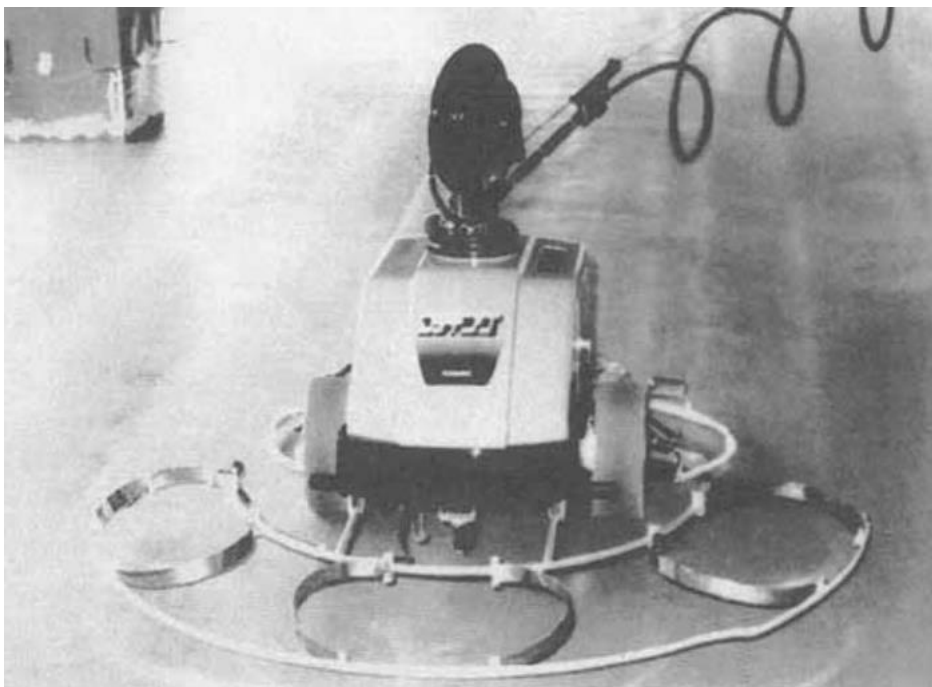
Rakennusrobotiikan kehittymisen katsotaan alkaneeksi 1970-luvun lopulla Japanissa, kun suuret rakennusliikkeet näkivät valtavan potentiaalin rakennusrobotiikan hyödyntämisessä. Myöhemmin 1980-luvun alussa kun robottiteknologia ja automaatio yleistyivät Japanissa, tuli rakennusrobotiikan hyödyntäminen ajankohtaiseksi. Tällöin valtio aloitti tukemaan yksinkertaisten rakennusrobottien kehitystä ja perusti tutkimusryhmiä yhdessä yritysten kanssa, jotta kehitystä rakennusrobotiikan osa-alueella tapahtuisi. Lukuisat yliopistot seurasivat esimerkkiä ja perustivat myös tutkimusryhmiä, jotka rupesivat kehittämään automatisoitua robottiteknologiaa hyödyntämällä laaja-alaista sekä eri tieteitä yhdistävää osaamista (kuva 2). (Thomas & Thomas 2016, s. 2–3)

Syyt rakennusrobotiikan kehittämiseen olivat sekä poliittisia että sosioekonomisia. Niitä olivat esimerkiksi rakennusalan huono tuottavuus verrattuna tehdastuotantoon, hyvän työvoiman puute, työvoiman ikääntyminen, ammattitaidon huonontuminen, työstä aiheutuvien sairauksien lisääntyminen sekä huonot työolot, jotka olivat kiistanalaisia puheenaiheita julkisuudessa. Rakennusteollisuus, jossa Japani oli perinteisesti ollut hyvämaineinen, kohtasi kovan paineen kehittää työympäristöä sekä yleistä mielikuvaa rakennusalaista. (Thomas & Thomas 2016, s. 1)



Kuva 2. Aikajana näyttää eri instituutioiden tutkimuksista yksinkertaisten robottien kehitykseen (Thomas & Thomas 2016, s. 4).

Ensimmäiset rakentamisrobotit 1970-luvulla olivat niin sanottuja ”single-task construction robotseja” (STCRs) eli yhden tehtävän rakentamisrobotteja (kuva 3). Ne kehitettiin Japanissa ja suunniteltiin suorittamaan yksittäisiä toistuvia rakennustehtäviä. Se, että STCRs oli suunniteltu suorittamaan ainoastaan yksittäisiä rakennustehtäviä, oli samalla sekä hyvä että huono asia. Hyvinä puolina oli se, että koko työmaata ei tarvinnut automatisoida ja robotit kykenivät toimimaan normaalin työn lomassa. Huonoina puolina oli niiden huono sopivuus työmaan jatkuviin muutoksiin sekä ongelmat toimimisessa turvallisesti työntekijöiden lomassa. Robottien ohjelmointi, varustaminen ja siirtäminen olivat aikaa vievää sekä monimutkaista. Nämä aiheuttivatkin usein tuotannon tehokkuuden heikkenemistä eikä tehostumista. Tämän takia ensimmäisen sukupolven rakentamisrobotit ja niiden ongelmien tunnistaminen johti vuodesta 1985 lähtien ensimmäisiin hankkeisiin, joissa yhdistettiin yksinkertaisia automatisoituja robotteja rakennustyömaalla sijaitseviin tehtäisiin ja niissä olevaan perusteknologiaan. Tämän takia rakentamisrobottien kehitys sekä tapa, jossa tehdään työmaasta sopivampia roboteille, edistyivät. (Thomas & Thomas 2016. s. 2)



Kuva 3. Lattiavalujen tasoitukseen erikoistunut robotti. (Hasegawa 2006).

STCRs-tekniikan kehittäminen raivasi tietä koko rakennusalan robotisaation kehitykselle. Tietotekniikan kehittymisen myötä 1990-luvulla Japanissa kehitettiin monia eri konsepteja rakennustyömaan automatisointiin. Rakentamisrobotit kehittyivät enemmän avustaviin työtehtäviin ja sen myötä ajatus koko rakennustyömaan

muuttamiseksi robottien ehdoilla toimivaksi kokonaisuudeksi vähentyi. Rakennustyömaan automatisoimista ovat 2000-luvulle tultaessa alkaneet tutkimaan myös useat muut maat Japanin lisäksi. (Thomas & Thomas 2016, s. 2)

2.3 Rakentamisrobotiikan haasteita

Rakennusteollisuudessa olisi varmasti tarvetta monille toimiville rakentamisroboteille. Kosken (Koski 2018) mukaan rakennusautomaation lisäämisen tarve työmailla johtuu siitä, että rakentamisen tuottavuutta, laatua ja imagoa olisi parannettava, rakentamisaikaa lyhennettävä, rakennustöiden työturvallisuutta ja ergonomiaa kehitettävä, sekä vaarallisissa paikoissa ihmistyöskentelyä pitäisi vähentää. Toimivien rakentamisrobottien hyödyntäminen voisi olla yksi ratkaisu edellä mainittuihin kehittämistarpeisiin.

Robotteja on hyödynnetty teollisuudessa laaja-alaisesti jo vuosikymmeniä useissa hankalissa ja monimutkaisissakin töissä, mutta rakennustyömailla robottien käyttö on vielä 2000-luvullakin hyvin vähäistä. Suurin ongelma rakennustyömaiden robotisoimiselle on työmaan jatkuva muuttuminen. Tehdasympäristössä työpisteet pysyvät jatkuvasti samana, joten roboteilta vaaditaan vähemmän ja ne kyetään ohjelmoimaan paljon yksinkertaisemmin kuin jatkuvasti muutoksessa olevalla työmaalla. Rakennustöiden työpisteet muuttuvat joskus jopa useita kertoja tunnissa ja tehtävät voivat olla joka kerta eri tavalla suoritettavia, eli epätoistuvia. (Koski 2018) Tämän vuoksi työmaalla olevien robottien täytyy kyetä liikkumaan tai niitä on kyettävä liikuttamaan helposti paikasta toiseen, sekä niissä on oltava tehokasta koneälyä suoriutumaan muuttuvista töistä. Tällöin niissä on poikkeuksetta oltava myös erilaisia liike-, navigointi- ja aistijärjestelmiä havainnoimaan sekä liikkumaan ympäristössään sekä tarkkailemaan toimintaansa. Työmaat ovat usein myös sotkuisia ja kulkureiteille voi olla jätetty tavaroita, jotka hankaloittavat robottien toimintaa. Rakennustyömaan muuttuvat olosuhteet, kuten pöly, lämpötila ja kosteus aiheuttavat myös lisävaatimuksia robottien toiminnalle. (Koski 2015)

Haasteena rakentamisrobottien kehittämiseksi on myös niiden kustannukset. Toimivan ja teknisesti laadukkaan robotiikan kehittäminen ja käyttöönotto vaatii yritykseltä mittavia investointeja. Kilpaillulla alalla mittavat investoinnit ovat riski, ja niiden täytyy maksaa itsensä takaisin. Tällöin pieleen mennyt kallis tutkimus- ja kehityshanke ei välttämättä ole mieluinen vaihtoehto rakennusyrittäkselle. Suurilla rakennusyrittäjillä olisi kyllä resursseja kehittää uutta teknologiaa, mutta koska rakennusprojektien työvaiheet pilkotaan usein monelle eri erityisurakoitsijoille, ei motivaatiota uusien laitteiden

kehitykselle ole. Pienillä erikoisurakoitsijoilla ei taas ole resursseja pitkäjänteiseen kehitystyöhön eikä välttämättä edes halua kehittää robotteja töidensä tekoa varten. (Koski 2018)

3. RAKENTAMISROBOTIIKAN NYKYTILA

3.1 Rakentamisrobotiikka Suomessa

Rakennusala pidetään Suomessa yleisesti tekniikaltaan hieman jälkeenjääneenä verrattuna tehdastuotantoon. Rakennustyömaiden osalta Suomessa ei ole vielä suuria määriä robotteja, jotka suorittaisivat rakennustöitä.

Suomessa työtunnin hinta on Euroopan seitsemänneksi suurin ollessaan 32,3 euroa (Eurostat newsrelease 2015), joten tarvetta rakentamisen robotisoinnille varmasti olisi. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään Suomessa kehitettyjä rakentamisrobotteja.

3.1.1 Robotti-imuri Pulu M

NCC Suomi Oy, Palmia Oy, Pulurobotics Oy sekä Helsingin yliopiston tietojenkäsittelylaitos alkoivat kehittää rakennustyömaan siivousrobottia (kuva 4) vuonna 2018. Projektin tavoitteena oli kehittää konsepti, jolla työmaan imurointityö voitaisiin automatisoida. Robotti koostuu kolmesta eri toiminnallisesta kokonaisuudesta, jotka on yhdistetty toisiinsa. Laitteen perustana toimii Puluroboticsin luoma Pulu M autonominen robottialusta, joka kykenee liikkumaan ja navigoimaan itsenäisesti. Tämä kyky mahdollistaa siihen liitettävän suuren määrän eri laitteita, jotka kykenevät hyödyntämään sen ominaisuuksia. (Heinonen 2019, s. 26)

Alustan päälle on liitetty tavallinen teollisuuspölynimuri, joka on muutettu toimimaan tasavirralla, jotta sen käyttäminen akustolla olisi mahdollista. Imuriin on liitetty pieni moottori, joka laitteen tekoälyä totellen nostaa ja laskee siihen liitettyä suulaketta halutun imurointituloksen saamiseksi. (Heinonen 2019, s. 28)

Helsingin yliopiston tietojenkäsittelylaitos on kehittänyt laitteen käyttöliittymän, joka kykenee keskustelemaan alustan ohjelmiston kanssa sekä mahdollistaa myös alustan manuaalisen ohjauksen. Käyttöliittymä muodostaa alustan 3D TOF -antureiden avulla kolmiulotteisen pistepilvikartan, jonka pohjalta navigointi ja reitinsuunnittelu tapahtuvat. Laitteeseen on ohjelmoitu algoritmi, joka laskee pistepilvikarttaa hyödyntäen tehokkaan siivousreitin, jotta valittu työskentelyalue tulee imuroitua. Imurointitoimenpiteen jälkeen siivousrobotti palaa automaattisesti latausasemaansa seuraavaa tehtävää varten. (Heinonen 2019, s. 28)

Alustan 3D TOF -antureiden toiminta perustuu valon takaisinheijastukseen, jonka avulla laite kykenee mittaamaan ympärillä olevien esineiden etäisyyden. Laite kykenee tunnistamaan tilassa liikkuvat ihmiset ja tarvittaessa väistämään niitä. Se kykenee myös hahmottamaan tilassa olevat esteet, niiden ääriviivat sekä korkeudet. Näiden ominaisuuksien avulla siivousrobotti kykenee tunnistamaan esteet, joiden alta se kykenee ajamaan törmäämättä niihin. Anturitekniikka tunnistaa myös läpinäkyvät esteet, kuten lasiovet tai -seinät. (Heinonen 2019, s. 29)



Kuva 4. Siivousrobotti työskentelemässä toimintaympäristössään (Heinonen 2019).

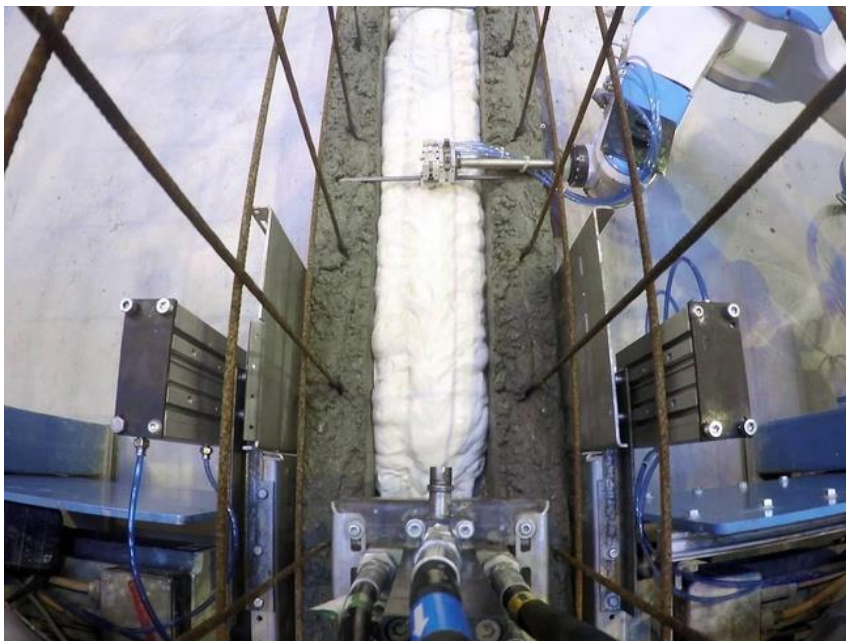
Pölyisyys on suuri terveydellinen ongelma rakennustyömailla. Työskentelyn jälkeen olisi järkevintä aloittaa siivoustyö vasta useiden tuntien jälkeen, jotta ilmassa oleva pöly ehtisi laskeutua lattian pintaan. Käytännössä näin ei tapahdu, koska työaika on usein rajoitettu tietylle ajalle, eikä olisi välttämättä järkevää jättää rakennussiivoojia yksin imuroimaan illaksi ilman työnjohtoa. Siivousrobotti kykenee työskentelemään myös työaikojen ulkopuolella tehokkaasti ja turvallisesti. Robotin etu on sen työnjäljen tasalaatuisuus, eikä se jätä epähuomiossa alueita imuroimatta, mitä rakennussiivooja saattaa tehdä. Testiajojen perusteella siivousrobotin työnjälki on jopa huomattavasti laadukkaampaa kuin rakennussiivoojalla. Siivousrobotin käyttö tuottaa myös kustannussäästöjä esimerkiksi työntekijöiden tehokkaamman käytön sekä työmaan pölyisyyden vähenemisen myötä. (Heinonen 2019, s. 34)

Projektista saadut tulokset olivat lupaavia ja osoittivat, että rakennustyömaata voidaan ylipäättään automatisoida onnistuneesti. Siivousrobotti kykenee toimimaan muuttuvassa työympäristössä ja voisi olla ratkaisu tuottavuuden sekä työturvallisuuden parantamisessa rakennustyömaalla. Robotti on tällä hetkellä vasta

prototyyppivaiheessa, mutta sitä ollaan kehittämässä kaupallistamista varten. (Heinonen 2019, s. 35)

3.1.2 Elementtirobotti RoboCatt

Imatralainen startup-yhtiö Fimatec Oy julkaisi vuonna 2017 uuden 3D-tulostimen (kuva 5), joka kykenee tulostamaan kuusi metriä pitkiä ja kolme metriä korkeita teräsbetonielementtejä laboratorio-olosuhteissa vain 40 minuutissa, kun normaalisti sellaisen tekemiseen menisi kokonainen työpäivä. Yhteistyössä ABB Roboticsin kanssa kehitetty laite kykenee tekemään samanaikaisesti betonielementin kuoret, lisäämään niiden väliin lämpöeristeen sekä asentamaan sähkökalusteet ja raudoitukset valun sisään. Se kykenee tulostamaan myös kaarevia elementtejä. Robotti pystyy poimimaan rakennesuunnittelijalta saadusta 3D-mallista suoraan elementtien mitat, aukot sekä raudoitukset. Fimatec Oy:n projektipäällikkö Lankisen mukaan ”Laite tekee elementille verkkomaisen luurangon, ja robottikädet lisäävät betoniin raudoituksia tarpeen mukaan. Tulostin osaa tehdä myös pistorasioiden paikat valmiiksi”. Tulostimesta on tarkoitus tehdä liikuteltava versio, joka voidaan pystyttää rakennustyömaalle, jolloin elementtitehdas olisikin paikan päällä. Laitetta ohjaa yksi työntekijä, joka seuraa prosessia ja pystyy keskeyttämään sen tarvittaessa. (Rissanen 2017)



Kuva 5. RoboCatt tulostamassa betonisandwich-elementtiä (Törmänen 2017).

Vuoden 2019 alussa Fimatec ilmoitti RoboCatt-projektin olevan jäissä johtuen betonimassan tasalaatuisuusongelmista (Ylönen 2019). Laite tarvitsee hyvin tasalaatuista betonimassaa, jotta se kykenisi toimimaan moitteetta. Suomen Asiakastieto Oy:n (Suomen Asiakastieto Oy 2019) mukaan yritys on ajettu sittemmin konkurssiin eikä laitteen tulevaisuudesta ole tietoa.

3.2 Rakentamisrobotiikka maailmalla

Suomessa ei ole käytännössä ollenkaan rakentamisrobotteja työmaakäytössä, mutta esimerkiksi Japanissa ja Yhdysvalloissa on kehitelty useampiakin toimivia robotteja rakennustyömaan käyttöön. Varsinkin Japani on rakentamisrobotiikan kärkimaana kehittänyt paljon eri robottiprototyyppisiä, joista osa esitellään tässä työssä. Silti edistyneinkään rakentamisrobotti ei ole yleistynyt maailmalla työmaakäytössä.

Seuraavaksi työssä esitellään muutamia edistyneimpiä rakentamisrobotteja, joita joko hyödynnetään rakennustuotannossa useilla työmailla tai sitten ovat potentiaalisia prototyyppisiä, joita on testattu työmailla. Tutkimukseen on poimittu edistyneimmät ja tulevaisuudessa mahdollisesti yleisesti käytössä olevat robotit.

3.2.1 Hitsausrobotit

Suuria teräsrunkoja tehtäessä hitsausaumoja muodostuu valtava määrä. Hitsaustyöt ovat yksi vaarallisimmista rakennustöistä, varsinkin jos laitteisto ja työntekijän osaaminen on heikkolaatuista. Työstä saattaa aiheutua silmävahinkoja, palovammoja sekä vaarana on myös myrkyllisten kaasujen hengittäminen. Jos rakenteiden liitokset eroavat kuitenkin vain vähän toisistaan, on niiden hitsaustyö usein toistuvaa ja ne kyetään suorittamaan roboteilla. Japanissa ja Etelä-Koreassa on kehitelty useita eri hitsausrobotteja suorittamaan palkkien ja pilareiden liitostöiden hitsauksia. (Thomas & Thomas 2016, s. 147) Seuraavaksi esitellään yksi niistä.

Robo-Welder on Shimzu Corporationin kehittämä hitsausrobotti, joka robottikättään hyödyntäen määrittää lasermittauslaitteistolla hitsattavan kohdan. Tämän jälkeen se päättää tavan, jolla hitsaus suoritetaan ja hitsaa teräspilarit yhteen. Yleensä kaksi hitsausrobottia työskentelee yhdessä yhden pilarin ympärillä. (Shimzu Corporation 2018)

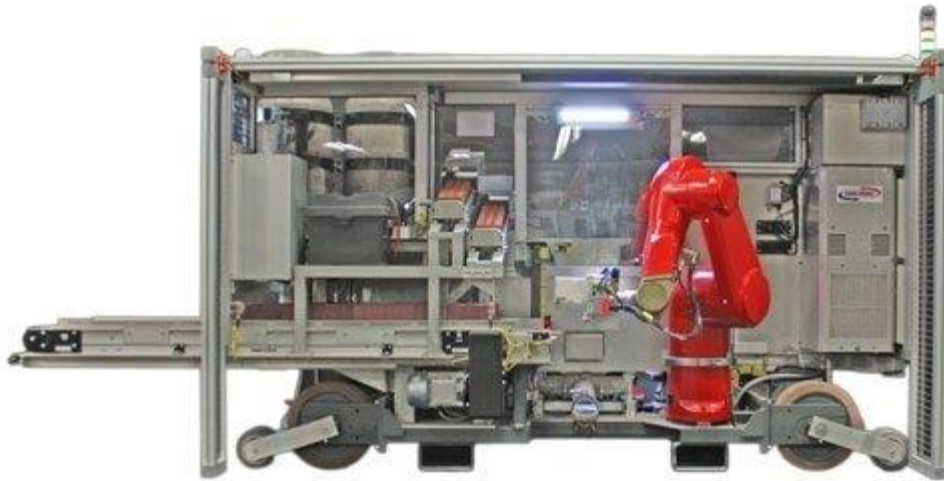


Kuva 6. Kaksi Robo-Welder-robottia hitsaamassa pilaria (Shimzu Corporation 2018).

Yllä olevasta kuvassa (kuva 6) nähdään, kuinka kaksi hitsausrobottia työskentelevät yhdessä pilarin ympärillä. Robottikädessä on kuusi akselia, joiden ansiosta robotti kykenee liikuttamaan hitsauspäättä useassa eri kulmassa hitsaussaumalla. Robo-Welder on ollut testikäytössä kerrostalotyömaalla Osakassa. (Shimzu Corporation 2018)

3.2.2 Muurausrobotit SAM100 ja Hadrian X

Yhdysvaltalainen Construction Robotics on kehittänyt puoliautomaattisen muurausrobotti SAM100 (kuva 7), joka kykenee nostamaan tiilen, levittämään sille laastia ja asettamaan sen oikealle paikalleen tarkasti. Laitteen tietokoneohjauksella kyetään määrittelemään ovien, ikkunoiden ja erityisten rakennelmien sijainnit, jotta muuraustyö onnistuisi tarkasti. Laite ei kykene toimimaan yksin, vaan tarvitsee muurarin lataamaan tiiliä robottiin sekä tarkkailemaan muurauksen laatua. Valmistajan mukaan robotti säästää 50 % työvoimakustannuksia ja sen tuottavuus on 3–5-kertainen ihmisvoimin toteutettuun muuraustyöhön verrattuna. Se kykenee muuraamaan noin 3 000 tiiltä päivässä, mikä vastaa noin kuusinkertaista työnopeutta käsin tehtyyn muuraukseen verrattuna. SAM100 robotit ovat olleet käytössä Yhdysvalloissa ja Isossa-Britanniassa useissa eri projekteissa. (Seppänen 2017)



Kuva 7. Muurausrobotti SAM100 (Construction Robotics 2019)

Australialainen Fastbrick Robotics on kehittänyt muurausrobotin, joka kykenee muuraamaan talon alusta loppuun ilman ihmisen avustusta. Hadrian X -niminen robotti (kuva 8) muuraa jopa 1000 tiiltä tunnissa hyödyntäen teleskooppivartta, jonka sisällä tiilet liikkuvat kohti varren päässä olevaa robottikättä. Sen sisään lastataan tiililava, jonka jälkeen laite kykenee automaattisesti muuraamaan sille syötetyn 3D-mallin mukaisen kohteen ilman valvontaa. Laite leikkaa tiilet oikean kokoiseksi, lisää niihin erikoislaastia, joka kovettuu 45 minuutissa ja asettaa ne oikeille paikoilleen. (TechStartups Team 2019)



Kuva 8. Hadrian X muuraamassa taloa (Brightmore 2019).

Fastbrick Roboticsin (FBR.com) mukaan laite kykenee muuraamaan omakotitalon seinät vuorokaudessa tarkasti ja työturvallisesti vähentäen samalla rakennusjätteitä sekä kustannuksia. Tällä hetkellä Hadrian X on tehnyt vasta demokohteita, mutta pyrkii laajentamaan tuotantoaan rakennusteollisuuden käyttöön (Brightmore 2019).

3.2.3 Rakenteiden 3D-tulostus

Rakenteiden 3D-tulostamisella pystytään luomaan monia arkkitehtuurisesti monimutkaisempia sekä näyttävämpiä ratkaisuja verrattuna perinteisiin menetelmiin. 3D-tulostaminen on yleistynyt maailmalla monella eri osa-alueella ja sen käyttöä rakennustuotannossakin on tutkittu ja kokeiltu. (Ventä et al. 2018)

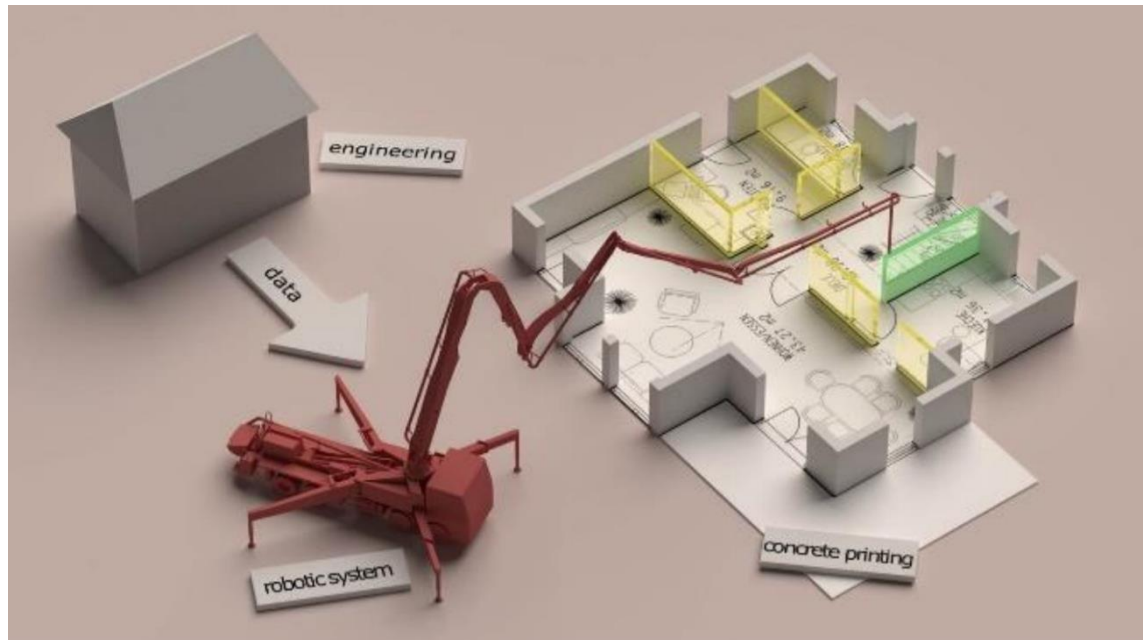
Rakennuksen rungon tekeminen sitoo paljon työvoimaa ja se on hyvin aikaa vievää. Paikallavalurungon muottien teon kustannukset ovat noin 25–35 % rungon kustannuksista ja rakennusaika riippuukin yleensä niiden teosta. (Schmitt 2001) Näiden takia rungon tekeminen 3D-tulostuksella voisi tuoda suuria säästöjä, koska se poistaa tarpeen muottien valmistuksesta sekä niiden purkutöistä. Taloudellisesta näkökulmasta katsottuna rakenteiden 3D-tulostuksella voidaan saada kustannussäästöjä 25 % ja 4–6 kertaa nopeammat suoritusajat verrattuna perinteiseen muurausrakentamiseen. (Krause ym. 2018.)



Kuva 9. Suorakulmaista rakennusta tulostettaessa tulostuslaite asetetaan talon ulkopuolelle (Krause ym. 2018).

CONPrint3D-menetelmäksi kutsutussa 3D-tulostamisessa (kuva 9) keskeinen prosessi on kolmiulotteisen tietomallin ”leikkaaminen” kaksiulotteisiksi kerroksiksi, joihin on

määritelty kerroksen paksuus. Leikkaamisen yhteydessä malliin tallennetaan tärkeitä parametrejä, kuten tulostusreitti, tulostusnopeus ja materiaalin tulostusmäärä. Näistä tiedoista kootaan G-koodi, joka syötetään tulostuslaitteelle ohjauskäskyiksi. Mallia käytetään esikatselemaan virtuaalisesti laitteen näytöltä ennen tulostusta. (Krause ym. 2018)



Kuva 10. Laitte jättää ovien ja ikkunoiden yläpuolet tulostamatta (Krause ym. 2018)

Tulostaminen tapahtuu betonipumppuautoon liitettyllä erityisellä lisälaitteella. Pumppuautoon lisätään tekoälyä ja teknisiä lisälaitteita, jotka liikuttavat sen vartta automaattisesti tietomallin mukaan. Tulostus suunnitellaan laskemalla tulostusreittien koordinaatit sekä tulostuslaitteen sijainti. Tulostuslaitteen sijainti riippuu rakennuksen muodosta. Suorakaiteen muotoisen rakennuksen teossa tulostuslaite sijoitetaan sen ulkopuolelle (kuva 10). Jos rakennus on ympyrän muotoinen, asetetaan tulostuslaite sen keskelle. Rakenteiden tulostus tehdään kerroksittaisilla betoninauhoilla käyttäen määrättyllä notkeudella valmistettua 16 mm raekoon betonia. Betoninauhan paksuus on noin 5 cm. Rakennuksen kulmat voidaan tehdä joko pyöristettyinä tai joka toinen kerros lomittain kuten muurauksessa, jotta rakenteiden saumat eivät olisi päällekkäin. Lomittain tekeminen varmistaa edellisen kerroksen sauman jäämisen uuden ehjän kerroksen alle, jotta kulmat liittyvät toisiinsa tarpeeksi kestävästi. Tutkimuksen mukaan luotettavan 3D-tulostamisen saamiseksi täytyisi kuitenkin teknologian vielä kehittyä. (Krause ym. 2018)



Kuva 11. Havainnekuva Yhdysvaltalaisesta Vulcan 3D-tulostimesta (Warren 2018).

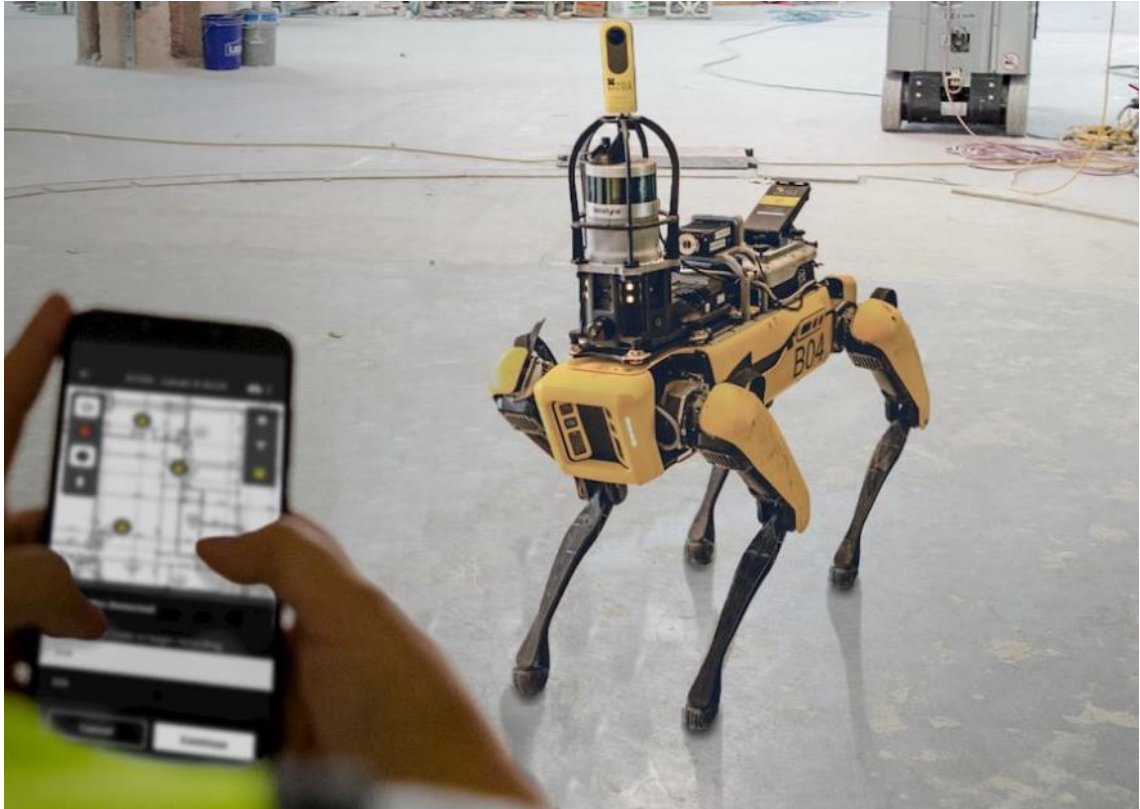
Yhdysvaltalainen startup-yritys ICON on kehittänyt oman Vulcan 3D-rakennustulostimen (kuva 11), joka kykenee valmistajan mukaan tulostamaan yksikerroksisen 60 neliömetrin kivitalon jopa 12 tunnissa. Talon rakennuskustannukset ovat ICONin mukaan noin 8500 euroa, mutta yrityksen tavoitteena on laskea kustannuksia 3400 euroon. Yrityksen tavoitteena on rakentaa noin 100 tulostettua taloa El Salvadoriin. (Warren 2018)

3.2.4 Valvontarobotti SpotWalk

Työmaan valvonta vie työnjohdolta valtavasti aikaa. Työmailla on esimerkiksi jo muutamia vuosia ollut käytössä drone-lennokkeja, jotka kykenevät ottamaan pistepilvikuvia työmaan eri vaiheista. Pistepilvikuvat yhdistyvät tietokannassa toisiinsa, jonka jälkeen työmaan ulkopuolta pystytään tarkastelemaan etänä. (Thomas & Thomas 2016, s. 19) Drone-kuvauksilla ei kuitenkaan tällä hetkellä voida tarkkailla sisäpuolen työvaiheita, vaan niillä otetaan usein pistepilvikuvat muutamien viikkojen välein työmaan ulkopuolelta.

Yhdysvaltalaisyrietykset HoloBuilder ja Boston Dynamics ovat kehittäneet yhdessä työmaan valvontaa helpottavan SpotWalk-valvontarobotin (kuva 12). Se kykenee liikkumaan työmaalla automaattisesti ottaen 360°:n kuvia, joiden avulla työmaan etenemistä voidaan seurata etänä. Tämä vapauttaa työmaan työnjohtoa turhalta kävelytyltä ja takaa tarkan sekä johdonmukaisen työmaan 360°-mallin päivittämisen pitkin rakennusprojektia. Valvontarobotin luoma malli työmaasta päivittyy pilvipalvelimelle,

joten sitä pystytään tarkastelemaan mistä päin maailmaa tahansa. Sitä voidaan hyödyntää esimerkiksi asiakkaiden sekä suunnittelijoiden kanssa työskenneltäessä. Valvontarobottia ohjataan SpotWalk-sovelluksella, jossa on kaksi eri toimintatilaa. Ensimmäisessä ohjaaja kykenee itse liikuttelemaan robottia haluamaansa paikkaan älypuhelimessa olevalla ohjaimella. Toisessa tilassa robotti kävelee automaattisesti sille ohjelmoitua reittiä pitkin. (HoloBuilder 2019)



Kuva 12. Spotwalk-valvontarobottia ohjataan mobiilisovelluksella (HoloBuilder 2019).

Spotwalk voidaan ohjelmoida kulkemaan automaattisesti tietyt reitit tietyin väliajoin, samalla kuvaten ympäristöään. Se ei vaadi ihmisen avustusta muuten kuin reittien syöttämisessä ja niiden koekävelyssä. Koneen tekoäly analysoi otetut kuvat, lähettää ne pilvipalvelimelle ja liittää ne tarkasti luomaansa 360°-malliin pyrkien täydentämään siinä olevia aukkoja. Se havaitsee ympärillään olevat esteet ja kykenee väistämään niitä samalla päästen paikkoihin, mihin ihmiset eivät välttämättä pääsisi. Valvontarobotti vähentää työmaalla kulkevien ihmisten määrää ja se kykenee menemään sellaisiinkin paikkoihin, joissa ihmisten ei olisi turvallista olla. Näiden ominaisuuksiensa ansioista valvontarobotti lisää työmaan työturvallisuutta. (Robotics business review staff 2019)

SpotWalk-valvontarobotti on ollut testikäytössä esimerkiksi San Franciscon kansainvälisen lentokentän kunnostusprojektissa, ja sen omistavat yritykset pyrkivät saamaan uusia asiakkaita tuotteelleen. Tällä hetkellä valvontarobotin pystyy saamaan

itselleen 6 kuukauden testikäyttöön, jossa asiakas saa kaksi SpotWalk-robottia, täydellisen HoloBuilder-teknologiapaketin sekä paikan päällä järjestettävän koulutuksen. (HoloBuilder 2019)

3.2.5 Paloeristeen ruiskutusrobotit

Rakennuksen teräsrakenteet vaativat rakennusmääräysten mukaan palosuojauksen. Palosuojaus voidaan toteuttaa vasta rakenteiden kiinnitysten jälkeen, jotta hitsaus ei vahingoittaisi sitä. (Thomas & Thomas 2016, s. 237)



Kuva 13. Shimizu Corporationin kehittämä SSR-3 paloeristeen ruiskutusrobotti (Thomas & Thomas 2016, s. 240)

Useat eri Japanilaisyrietykset ovat kehittäneet paloeristeen ruiskutusrobotteja. Ensimmäiset paloeristeen ruiskutusrobotit ilmestyivät työmaille 1980-luvulla ja uusia versioita niistä on julkaistu tämän jälkeen. Robotit on luokiteltu kahteen eri luokkaan. Ensimmäisessä luokassa ovat ne ruiskutusrobotit, jotka on rakennettu liikkuvan alustan päälle. Toisessa luokassa ovat ne robotit, jotka kiinnitetään suoraan suojattavaan pilariin tai palkkiin ja ne siirtyvät sen pintaa pitkin. Molempiin ryhmiin yhdistetään erillinen

järjestelmä, joka pumpkaa eristemateriaalin robotille. Robotit koostuvat niitä liikuttavista alustoista, laserpohjaisista automaattisista ohjausjärjestelmistä, ohjelmoitavista ohjausjärjestelmistä sekä robottikäsistä ja suuttimista (kuva 13). Kehittyneimmät laitteet tunnistavat ruiskutettavat muodot ja kykenevät seuraamaan niiden pintoja tarkasti. Laitteiden tehtävänä on nopeuttaa paloeristeen ruiskutustöitä sekä vähentää ihmisten altistumista ruiskutuspölylle. (Thomas & Thomas 2016, s. 238–241)

3.2.6 Raudoitusrobotti

Japanilainen Kajima Corporation on kehittänyt painavien raudoitusten siirtoon robotin. Laitetta käytetään muun muassa suurien perustuksien raudoitustöissä, joissa käytetään jopa 40 millimetriä paksuja ja 10 metriä pitkiä raudoituksia.

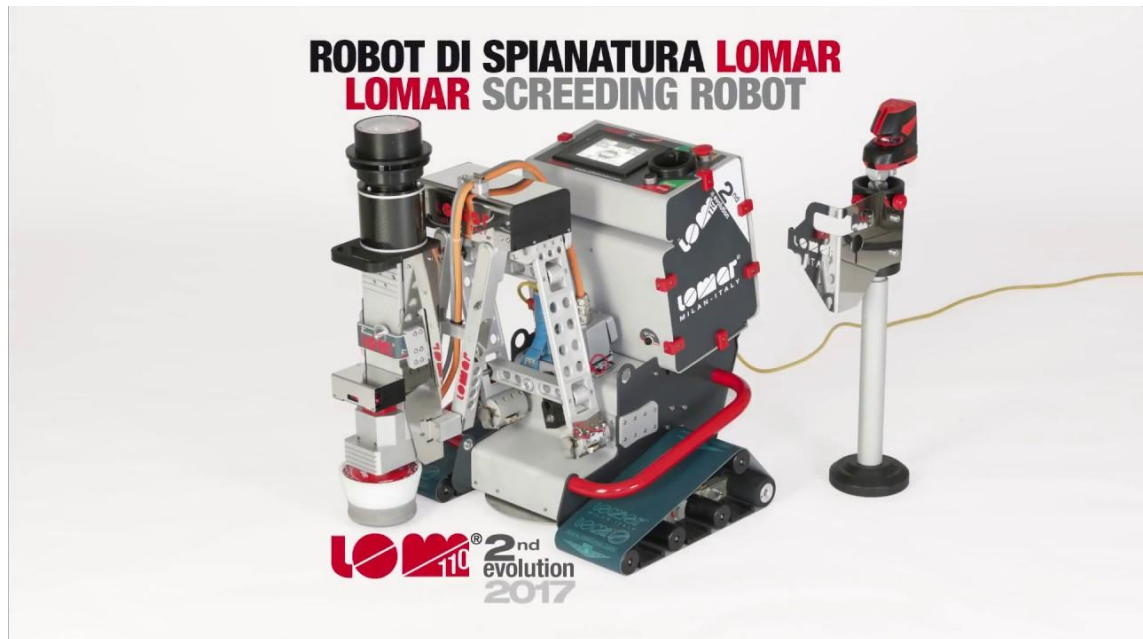
Robotti koostuu telaketjujen avulla liikkuvasta alustasta ja se muistuttaakin suuresti kaivinkonetta. Se kykenee varastoimaan 20 raudoitustankoa ja asettamaan ne yksi kerrallaan osoitettuihin paikkoihin. Yhden tangon siirtäminen oikealle paikalleen kestää noin minuutin. (Thomas & Thomas 2016, s. 40)

3.2.7 Betonin levitys-, tasoitus- ja hiertorobotit

Betonin levitykseen, tasoitukseen sekä hiertämiseen on varsinkin Japanissa kehitelty useita eri robotteja. Niiden avulla pyritään nopeuttamaan sekä helpottamaan raskaita betonitöitä.

Betonin levitykseen tarkoitettuja robotteja on kehitetty useita erilaisia. Osa roboteista muistuttaa nosturia ja niiden tehtävänä onkin levittää betonia ylhäältä päin vaadituille kohdille. Osa roboteista kulkee pyörien päällä samalla vetäen betonipumpun letkua perässään. Robotteja ohjataan haastavimmissa kohdissa ohjausyksiköistä, mutta ne kykenevät myös automaattisesti levittämään betonia määrättyille kohdille laajoissa, yksinkertaisissa kohteissa. (Thomas & Thomas 2016, s. 79–85)

Betonin tasoitus ja tiivistys ovat tiiviisti toisiinsa liittyviä työtehtäviä rakennustyömaalla. Betonin tasoitus on prosessi, jossa valettu tai karkeasti levitetty betoni tasoitetaan, jotta saadaan tiivis ja tasainen betonikerros joka kohtaan. Betonin tasoittamiseen sisältyy suuri määrä toistuvia toimintoja. Jos työ tehdään käsin, vaatii se suuren määrän voimaa, joka taas rajoittaa työn nopeutta ja kuluttaa paljon työntekijäresursseja. Työtehtävän automatisointi nopeuttaa tasoitusprosessia, parantaa työn tuottavuutta sekä varmistaa tasaisen laadun koko pinnalle. Useat yritykset ovat kehittäneet betonin tasoitus- ja tiivistysrobotteja helpottamaan työntekoa. (Thomas & Thomas 2016, s. 86)



Kuva 14. Italialainen LOMAR LOM110 betonipinnan tasoitusrobotti (Tilsonline 2019).

Italialainen yritys nimeltään Lomar on kehittänyt betonipinnan tasoitukseen suunnitellun LOMAR LOM110 robotin (kuva 14). Se koostuu liikkuvasta telaketjuaalustasta, sen päällä olevasta manipulaattorista sekä erillisestä laserohjausjärjestelmästä. Manipulaattorissa on sivuttain liikkuva tasoituslevy sekä laserohjattu järjestelmä, joka säätelee tasoituslevyn korkeutta ja liikettä. Erillinen laserohjausjärjestelmä asetetaan työskentelyhuoneeseen ja sen avulla robotti säätelee oikean tasoituskorkeuden. (Thomas & Thomas 2016, s. 93)

Betonilattian viimeistely eli hieto on yksi kriittisimmistä työvaiheista betonitoissa. Työntekijät työskentelevät ergonomisesti huonossa asennossa useita tunteja tasoittaen pintaa. Tähänkin työtehtävään on kehitetty useita eri robotteja nopeuttamaan työntekoa. Ensimmäiset betonipinnan hietorobotit tulivat markkinoille 1980-luvulla ja siitä asti niitä on kehitelty jatkuvasti. Tokimec on kehittänyt laitteen nimeltään Robocon, joka kykenee hietämään noin 800 neliometriä tunnissa, kun ihmistyöntekijä kykenee vain noin 120 neliometriin samassa ajassa. Se painaa 68 kg ja maksaa noin 20 000 dollaria. Laite kykenee toimimaan automaattisesti navigoiden ja väistäen esteitä. (Thomas & Thomas 2016, s. 94)

3.2.8 Kuljetusrobotti Robo-Carrier

Robo-Carrier (kuva 15) on Japanilaisyritys Shimizu Corporationin kehittämä kuljetusrobotti, joka kykenee nostamaan ja kuljettamaan tavaroita paikasta toiseen työmaan sisällä. Se on ollut vuonna 2018 testikäytössä pilvenpiirtäjätyömaalla Osakassa. Robotin päätehtävänä oli kuljettaa painavia kipsilevynappuja paikasta toiseen.

Laite toimii automaattisesti etukäteen ohjelmoituja reittejä pitkin tai ohjaajan antamia käskyjä hyödyntäen. Robotti kykenee yön aikana kuljettamaan kipsilevyt työpisteiden läheisyyteen, jotta työntekijät voivat kiinnittää ne työvuoron alkaessa aamulla. Se kykenee 5G-yhteyden avulla kommunikoimaan toisten vastaavien robottien kanssa ja koordinoimaan työtehtäviä, jotta ne suoritettaisiin tehokkaammin. Robotti kykenee tunnistamaan ja välttämään esteitä sensoreidensa avulla ja käyttää niitä myös saadakseen reaaliaikaisia paikkatietoja olinpaikastaan. Se myös pysähtyy, jos ihminen tulee sen kulkusuunnan läheisyyteen. Robotin voi yhdistää myös toimimaan yhdessä työmaan hissijärjestelmän kanssa. (Shimzu Corporation 2018)



Kuva 15. Robo-Carrier odottamassa käyttöönottoa (Shimzu Corporation 2018).

Laite on akkukäyttöinen ja kykenee kuljettamaan kerralla noin 900 kg kuorman. Akkuvirran vähentyessä se menee itsenäisesti laturiyksikköön latautumaan. Sen maksiminopeus on 2,4 km/h. (Shimzu Corporation 2018)

3.2.9 Alakattopaneelien asennusrobotti Robo-Buddy

Robo-Buddy on Shimzu Corporationin kehittämä alakattopaneelien asennusrobotti. Sillä on kaksi robottikättä, joissa molemmissa on kuusi akselia. Laitteen sensorit kykenevät tunnistamaan katossa olevan alakattorungon ja sen kiinnityspisteet, joihin kattopaneelit kiinnitetään. Tämän jälkeen toinen robottikäsi nostaa paneelin oikeaan paikkaansa ja tämän jälkeen toinen käsi ruuvaa paneelin kiinni runkoon. Laite on testikäytössä kerrostalotyömaalla Osakassa. (Shimzu Corporation 2018)



Kuva 16. Toinen robottikäsi tarttuu paneeliin ja toinen ruuvaa sen kiinni (Shimzu Corporation 2018)

Yllä olevassa kuvassa (kuva 16) näkyy, kuinka robottikädet työskentelevät yhteistyössä kiinnittäessään alakattopaneelia. Alakattojen asennuksessa työntekijä joutuu jatkuvasti nousemaan tikapuille sekä nostamaan painavia levyjä katonrajaan, joten toimiessaan sujuvasti robotti mahdollisesti vähentäisi tapaturmia sekä työntekijään kohdistuvaa räsitusta.

3.2.10 Maansiirtorobotiikka

Japanissa on jo vuosia ollut laajassa käytössä etäohjattavat maansiirtokoneet. Paikoissa, jossa ihmisen ei ole turvallista työskennellä esimerkiksi sortumien ja maanvyöryjen takia, pystytään maansiirtokonetta ohjaamaan turvallisesta paikasta etäohjauslaitteilla. Automaattisia maansiirtokoneita ei siellä ole kuitenkaan vielä käytössä. (Heikkilä et al. 2019)

Yhdysvaltalaisyritys Built Robotics on kehittänyt laitteiston, jolla kyetään muuttamaan tavallisia maanrakennustöissä käytettäviä koneita, kuten kaivureita, kauhakuormaajia ja puskutraktoreita lisäosan avulla automaattisiksi roboteiksi (kuva 17). Koneet kykenevät tämän jälkeen itsenäisesti suorittamaan niille annettuja maansiirtotöitä, kuten tekemään kaivantoja, kaivamaan perustuksia, siirtämään maamassoja sekä tasoittamaan pintoja. Laitteistoja ohjataan verkkopohjaisella alustalla, joka mahdollistaa niiden valvomisen etänä. (Crowe 2019)



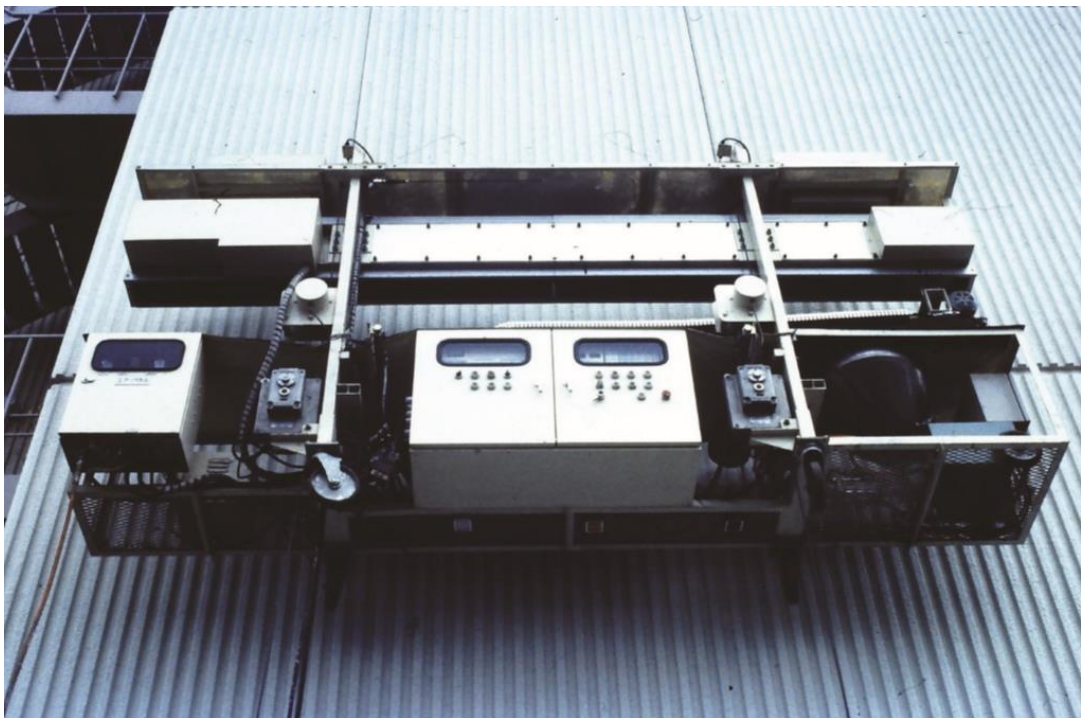
Kuva 17. Built Roboticsin laitteisto lisätty tavallisiin maansiirtokoneisiin. (Built Robotics 2019)

Laitteisto hyödyntää kameroita, GPS-paikannusta sekä optisia tutkia havainnoimaan ympäristöä sekä tehtyä työtä. GPS:ää käytetään sijainti- ja korkeustietoihin, kun taas optiset tutkat, kamerat ja laitteiston koneäly käsittelevät reaaliaikaisesti ympäröiviä esteitä sekä tehdyn työn tilaa. Työturvallisuuden takia koneet pysähtyvät, jos joku niiden havainnointilaitteista lakkaa toimimasta esimerkiksi linssin eteen joutuneen roskan takia. Yrityksen mukaan se on allekirjoittanut yli 100 miljoonan dollarin edestä asiakassitoumuksia. Laitteistoa on käytetty Yhdysvalloissa yli 7 500 tuntia esimerkiksi tuulipuisto-, asuinrakennus- sekä aurinkoenergiailaitostyömailla kaukana muusta asutuksesta, minne on yleensä ollut vaikeuksia löytää riittävästi työntekijöitä. Se on kaivanut yli 100 000 tonnia maa-ainesta aiheuttamatta yhtään onnettomuutta. Laitteistoa käytetään tällä hetkellä apuna yksinkertaisissa, toistuvissa töissä, vapauttaen työntekijöitä keskittymään muihin tehtäviin. (Crowe 2019)

Myös Suomessa on tutkittu maansiirtokoneiden automatisoimista. Oulun yliopisto julkaisi vuonna 2019 tutkimuksen, jonka aiheena oli kaivinkoneen työskentelyn automatisointi. Tutkimuksessa kaivinkone ohjelmoitiin matkimaan ihmisohjatun kaivinkoneen kaivuuliikkeitä ja keräämään tietoa tehdystä työstä. Kaivinkoneeseen lisättiin edullisia lisälaitteita, kuten sensoreita, koneälyä ja optisia tutkia. Automatisoiminen koettiin onnistuneeksi ja tulokset olivat positiivisia. Tulevaisuudessa tavoitteena on tehdä täysin itsenäisesti toimiva kaivinkone, joka kykenee suorittamaan kaivuutyön täysin suunnittelijan sille antamien ohjeiden mukaisesti. (Heikkilä ym. 2019)

3.2.11 Julkisivun maalausrobotit

Julkisivun maalausrobotit kehitettiin helpottamaan korkeiden rakennusten julkisivujen maalausta. Maalausroboteilla saavutetaan tasainen työnjälki niin uudisrakennusten kuin kunnossapitokohteiden maalauksessa ja niiden avulla vähennetään ihmisten altistumista maalin haitallisille kemikaaleille. Niissä on usein useampi ruiskutuskärki, jotka toimivat synkronoidusti toisiinsa nähden samalla kun laitteessa ovat kamerat tai sensorit tarkkailevat julkisivun pintaa ja siihen levittyvän maalipinnan laatua. Robotit kiinnitetään katolla olevaan kattoyksikköön, josta ne roikkuvat vajereiden avulla (kuva 18). Maali pumpataan laitteisiin maantasolla olevalla pumpulla. (Thomas & Thomas 2016, s. 184)



Kuva 18. Julkisivun maalausrobotti roikkuu katolta vajereiden varassa (Thomas & Thomas 2016, s. 185)

Robotit vaativat usein vähintään yhden työntekijän tarkkailemaan laitteen toimintaa katolle sijoitetulta ohjauskeskuksesta. Maalausrobotit pystyvät tuomaan kustannus- ja aikasäästöjä vasta, kun kyseessä on suurempi kuin 2000 neliömetriä oleva julkisivualue. (Thomas & Thomas 2016, s. 184)

4. RAKENTAMISROBOTIIKAN TULEVAISUUS

4.1 Seuraavat robotisoinnin kohteet

Rakentamisrobotiikan sovelluksia tarkasteltaessa suurimpana yhdistävänä tekijänä laitteiden välillä on ollut niiden työvaiheiden toistuvuus sekä yksinkertaisuus. Mitä vähemmän työpiste vaihtuu, työn suoritustapa muuttuu tai siinä on muuttuvia tekijöitä, sitä helpommin tehtävän pystyvät suorittamaan robotit. Toistuvaan yksinkertaiseen työtehtävään on helpompi suunnitella ja ohjelmoida tekoäly kuin kertaluontoiseen muuttuvaan työhön.

Tällä hetkellä näyttää siltä, että tulevaisuudessa rakennustyömaan imurointityöt voitaisiin suorittaa kehittyneillä robotti-imureilla. Myös työmaan valvontaan erikoistuneet dronet sekä valvontarobotit tulevat helpottamaan työnteon valvontaa. Robotit tulevat todennäköisesti myös suorittamaan suurien rakenteiden teräsrunkojen hitsaustöitä sekä julkisivujen maalauksia. Suurien hankkeiden yksinkertaiset toistuvat maankaivuutyöt tulevat myös siirtymään automaattisten robottien tehtäväksi. Muita toistuvia töitä ovat esimerkiksi suurten väliseinien teko, suuret muuraustyöt, maalaustyöt, lattioiden teot sekä betonin hionnat. Tulevien vuosien aikana näiden työvaiheiden tekoon erikoistuneet robotit tulevat varmasti yleistymään, kunhan teknologian hinta laskee.

Vielä ennen kuin työmaiden työntekijät korvataan roboteilla, tulee työmaille ilmestymään työntekijöiden työtaakkaa keventäviä exoskeleton-pukuja. Puettava ulkoinen tukiranka auttaa työntekijää kannattelemaan raskaita painoja, kuten työvälineitä sekä materiaaleja, pienentäen näin työntekijälle aiheutuvaa taakkaa. Pukuja on valmistettu moneen eri käyttötarkoitukseen helpottamaan eri tyyppistä raskautta. Exoskeleton-pukuja on käytössä myös Suomessa monella eri sektorilla. Esimerkiksi Turkulainen Arkea kiinteistöhoitoyritys on ottanut työntekijöilleen käyttöönsä noin 2500 euroa maksavat tukirangat helpottamaan raskaita kiinteistö töitä. Pyrkimyksenä on vähentää työtapaturmia sekä sairauspoissaoloja, nimittäin kolmasosa kiinteistöalan sairauspoissaoloista johtuu tuki- ja liikuntaelinsairauksista. (Collin 2019) Laitteet tulevat varmasti olemaan suuri apu raskaissa rakentamistöissä ja varsinkin töissä, joissa joutuu kannattelemaan koneita pään yläpuolella.

4.2 Rakentamisrobotiikan kehitys

Rakentamisrobotiikan nousukautta on odotettu jo vuosikymmeniä ja todennäköisesti saadaan vielä hetki odottaa lisää. Markets and Marketsin tekemän tutkimuksen (Market Research report 2018) mukaan rakentamisrobotiikan markkinoiden kasvuvauhti vuosien 2018 ja 2023 välissä on noin 17% vuodessa. Tutkimuksessa rakentamisrobotiikan markkinoiden ennustetaan yli tuplaantuvan 2023 mennessä, johtuen maailmanlaajuisesta kaupungistumisesta, vaatimuksista parannettuun tuottavuuteen, laatuun sekä turvallisuuteen.

Toisaalta Valtionneuvoston vuonna 2018 julkaiseman tutkimuksen mukaan (Ventä et al., 2018) ”vuoteen 2030 mennessä robotiikasta ja automaatiosta johtuvan rakennusalan tuottavuuden kasvuksi (Suomessa) arvioidaan 0 %.” Tämä kertoo karua todellisuutta rakentamisrobotiikan nykytilasta ja rakennusteollisuuden kankeudesta Suomessa. Teknologia kehittyy jatkuvasti nopeammin kuin koskaan ennen, joten rakentamisrobotiikan kehitys myös varmasti lisääntyy maailmalla.

5. YHTEENVETO

Tutkimuksen mukaan rakentamisrobottien määrä Suomessa on olematon. Testikäytössä on ollut kyllä eri laitteita, mutta työmailla näitä ei vielä tällä hetkellä ole käytössä. Työmaan robotti-imuri toimii, mutta sitä kehitetään vielä paremmaksi ja se saatetaan nähdä tulevina vuosina yleisesti käytössä työmailla hoitaen imurointityöt. Elementtien 3D-tulostusta työmailla saamme vielä hetken odottaa tapahtuvaksi, koska kyseistä laitteistoa kehittävä yritys ei ole saanut käyttöönsä tarpeeksi tasalaatuista betonimassaa.

Rakennustyömailla robotisoidut työvaiheet ovat suurimmaksi osaksi yksinkertaisia sekä toistuvia töitä. Maailmanlaajuisesti rakentamisrobotiikkaa on jo jonkun verran käytössä, mutta yleisiä robotit eivät silti vielä ole. Jonkin asteen prototyyppejä on varmasti yritetty kehittää lähes jokaista työvaihetta varten. 3D-tulostus tulee varmasti yleistymään vielä varsinkin yksityiskohtien teossa, mutta vielä hetken ei talojen runkoja 3D-tulostamalla tehdä. Jo tällä hetkellä hitsausrobotiikka on kehittynyttä ja hitsausrobottien käyttö teräsrunkojen hitsauksessa varmasti yleistyy tulevaisuudessakin. Paloeristeen ruiskutusrobotteja on jo käytössä varsinkin Japanissa ja niiden avulla teräsrunkojen paloeristys suoritetaan nopeammin sekä turvallisemmin kuin aikaisemmin. Maankaivuutöiden automatisointia tutkitaan eri puolilla maailmaa ja Yhdysvalloissa itsenäisesti työtä tekevät maansiirtokoneet ovat jo mukana joissain rakennustyömailla. Julkisivun maalaukseen sekä betonin levitys-, tasoitus- sekä hiertotöihin on kehitetty jo useita eri robotteja, jotka yleistyessään tulevat nopeuttamaan kyseisiä töitä huomattavasti perinteisiin menetelmiin verrattuna. Työmaan sisäiseen logistiikkaan sekä kattopaneelien asentamiseen erikoistuneita robotteja kehitetään ja niitä on käytössä varsinkin Japanissa. Rakentamisen potentiaalisimmat robotisointikohteet lähivuosina ovat tutkimuksessa esitettyjen robottien työlajit.

Rakennustöiden siirtyminen robottien tehtäväksi korostuu varsinkin vaativissa projekteissa, joissa työnlaadun on oltava tarkkaa sekä tasalaatuista. Korkean tulotason maissa, joissa on pula osaavista työntekijöistä, on varmastikin tarvetta rakentamisroboteille, mutta matalan tulotason kehittyvissä maissa robotteja ei tulla näkemään rakennustyömailla vielä vuosikymmeniin. Rakennuslalla tapahtuu joka kymmenes Suomessa aiheutuneista työtapaturmista (Työturvallisuuskeskus 2015). Jos robottien avulla työmaiden henkilömäärä laskisi, saattaisi tapaturmienkin määrä laskea. Menee vielä kuitenkin vuosia, ennen kuin robotit korvaavat työntekijöitä Suomessa. Sitä

ennen työntekijöitä helpottavat exoskeleton-puvut tulevat varmasti yleistymään rakennustyömailla.

Jotta robottia kyetään hyödyntämään rakennustyömaalla, vaatii se itse laitteelta paljon. Sen täytyy olla tehokas ja nopeuttaa työntekoa tai lisätä työturvallisuutta, jotta se olisi investointina kannattava. Se ei saa myöskään maksaa liikaa, jotta olisi ylipäättään järkeä hankkia laite korvaamaan tai avustamaan työntekijää. Laitteen on oltava kompakti ja siirrettävä, että sitä voidaan liikutella rakennustyömaan sisällä helposti mestalta toiselle. Sen on oltava luotettava, nopeasti käyttöönotettavissa sekä helppokäyttöinen, jotta sen käyttäminen ei vaatisi kohtuuttomasti työntekijöiden aikaa. Robotin pitää kestää rikkoutumatta työmaan ympäristörasitukset, kuten pölyisyys, vaihtelevat lämpötilat ja roiskeet. Rakennustyömaan muuttuvassa ympäristössä vaatimuksiin kuuluvat myös ympäristön havainnointikyky ja tarvittaessa vielä työmaalla navigointi ja liikkuminen.

Tutkimuksen luotettavuutta arvioidessa tarkastelu kohdistuu pääasiassa lähteisiin. Tutkimuksen luotettavuutta vähentää osa lähteistä, jotka ovat robotteja kehittävien yritysten nettisivuja tai nettiartikkeleita. Yritykset antavat usein yliedustavan kuvan omista tuotteistaan tarkoituksenaan markkinoida niitä. Nettiartikkeleiden todenmukaisuutta ei ole aina helppo arvioida, varsinkin jos kyseessä on ulkomainen itselle vieras uutistoimisto. Silti pääpaino tutkimuksen lähteissä on luotettavat sivustot sekä tutkimukset, joten tuloksia voidaan pitää luotettavina.

LÄHTEET

Alasaari, J., Nykänen, J. (2017). Saatavissa (viitattu 17.12.2019):

<https://www.mylab.fi/zora-robotti-mursi-ennakkoluuloja/>

Brightmore, D. (2019). Hadrian X: Bricklaying robot to build demo homes, Construction global. Saatavissa (viitattu 20.11.2019):

<https://www.constructionglobal.com/equipment-and-it/hadrian-x-bricklaying-robot-build-demo-homes>

Built Robotics (2019). Saatavissa (viitattu 3.10.2019): www.builtrobotics.com

Collin, P (2019). Auttaako RoboCopin asu raskaissa kiinteistöissä? Yle Uutiset. Saatavissa (viitattu 27.12.2019): <https://yle.fi/uutiset/3-10595068>

Crowe, S. (2019). Built Robotics raises \$33M for autonomous construction vehicles, The Robotreport. Saatavissa (viitattu 3.10.2019): <https://www.therobotreport.com/built-robotics-33m-autonomous-construction-equipment/>

Eurostat Newsrelease (2015). Labour costs in the EU, Saatavissa: <https://ec.europa.eu/eurostat/documents/2995521/6761066/3-30032015-AP-EN.pdf/7462a05e-7118-480e-a3f5-34e690c11545>

FBR (2019). Saatavissa (viitattu 03.12.2019): <https://www.fbr.com.au/view/hadrian-x>

Hasegawa, Y. (2006). Construction Automation and Robotics In The 21st Century, Waseda University, Japan. Saatavissa:

<http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB12346.pdf>

Heikkilä, R., Makkonen, T., Niskanen, I., Immonen, M., Hiltunen, M., Kolli, T., Tyni, P. (2019). Development of an Earthmoving Machinery Autonomous Excavator Development Platform, University of Oulu. Saatavissa:

https://www.iaarc.org/publications/fulltext/ISARC_2019_Paper_206.pdf

Heinonen, H. (2019). Robotiikan hyödyntäminen rakennustuotannossa, Metropolia ammattikorkeakoulu, mestarityö. Saatavissa:

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/166874/Heinonen_Harri.pdf?sequence=2&isAllowed=y

HoloBuilder (2019). The Future Is Now: Meet the Game-Changing Construction Technology That's Already On-Site, Medium. Saatavissa (viitattu 10.12.2019):

<https://medium.com/holobuilder/meet-spotwalk-the-first-of-its-kind-robotic-360-capture-solution-for-construction-76d84bd27ec9>

Koski, H. (2010). Rakennuskonealan kehittämisohjelma, Valtion Tieteellinen

Tutkimuskeskus. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2010/VT-R-08355-10.pdf>

Koski, H. (2015). Rakentajain Kalenteri 2016, Rakennustieto Oy, Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry, Rakennustietosäätiö RTS. Saatavissa:

<https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK160501.pdf>

Koski, H. (2018). Rakentamisen tuotantotekniikka, luentomateriaali. Saatavissa rajoitetusti:

https://moodle2.tut.fi/pluginfile.php/563191/mod_resource/content/1/5%20Robotiikka.pdf

Markets and Markets (2018). Construction Robot Market. Saatavissa (viitattu 21.12.2019):

<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/construction-robot-market-266557111.html>

Merriam-Webster, Dictionary – Robot. Saatavissa (viitattu 18.10.2019):

<https://www.merriam-webster.com/dictionary/robot>

Oxford English Dictionary - Robot, The definitive record of the English language.

Saatavissa (viitattu 18.10.2019):

<https://www.oed.com/view/Entry/166641?rskey=SBo6fl&result=2&isAdvanced=false#eid>

Rissanen, V. (2017). Imatralla tehtiin maailman suurin 3d-betonitulostin, joka valmistaa kolme metriä korkeita rakennus-elementtejä, Rakennuslehti. Saatavissa (viitattu 21.11.2019):

<https://www.rakennuslehti.fi/2017/05/imatralla-tehtiin-maailman-suurin-3d-betonitulostin-joka-valmistaa-kolme-metria-korkeita-rakennus%c2%adelementteja/>

Robotics business review staff (2019). Boston Dynamics Touts Partnerships With Construction Firms. Saatavissa (viitattu 12.10.2019):

<https://www.roboticsbusinessreview.com/construction/boston-dynamics-touts-partnerships-with-construction-firms/>

Salo, S., Koskela, L. (1987). Rakentamisrobotiikka: Nykytila ja kehitysnäkymät, VTT Technical Research Centre of Finland. Saatavissa:

<https://cris.vtt.fi/en/publications/rakentamisrobotiikka-nykytila-ja-kehitysn%C3%A4kym%C3%A4t>

Schmitt, R. (2001). Die Schalungstechnik, Systeme, Einsatz und Logistik. Ernst u. Sohn, Berlin.

Seppänen, R. (2017). Sam-robotti muuraa 3000 tiiliskiveä päivässä, Rakennuslehti.

Saatavissa (viitattu 22.11.2019): <https://www.rakennuslehti.fi/2017/10/sam-robotti-muuraa-3000-tiiliskivea-paivassa/>.

Shimzu Corporation (2018). Robots under Autonomous Control at Robot Lab.

Saatavissa (viitattu 3.10.2019): <https://www.shimz.co.jp/en/company/about/news-release/2018/2018006.html>

Suomen Asiakastieto Oy (2019). Saatavissa (viitattu 15.12.2019):

<https://www.asiakastieto.fi/yritykset/fi/fimatec-oy-konkurssipesa/20281102/taloustiedot>

Thomas, B. Thomas, L. (2016). Construction Robots – Elementary Technologies and Single-Task Construction Robots, Cambridge University Press.

TechStartups Team (2019). Saatavissa (viitattu 01.11.2019):

<https://techstartups.com/2019/06/12/meet-hadrian-x-a-bricklaying-robot-that-can-build-a-house-in-three-days/>

Tilsononline (2019). Saatavissa (viitattu 23.12.2019):

<https://www.tilsononline.com.au/mixing-and-spraying-equipment/screed-mortar-mixers/lomar-lom110-automatic-screeding-robot/>

Työturvallisuuskeskus (2015). Saatavissa (viitattu 5.1.2020):
https://ttk.fi/tyoturvallisuus_ja_tyosuojelu/toimialakohtaista_tietoa/rakennusala/tyotapat_urmat_rakennusalalla

Ventä, O., Honkatukia, J., Häkkinen, K., Kettunen, O., Niemelä, M., Airaksinen, M., Vainio, T. (2018). Robotisaation ja automatisaation vaikutukset Suomen kansantalouteen 2030, Valtioneuvoston selvitys ja tutkimustoiminta. Saatavissa: [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161102/47-2018-ROBOFINN_raportti .pdf](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161102/47-2018-ROBOFINN_raportti.pdf)

Warren, T. (2018). This cheap 3D-printed home is a start for the 1 billion who lack shelter, The Verge. Saatavissa (viitattu 22.11.2019): <https://www.theverge.com/2018/3/12/17101856/3d-printed-housing-icon-shelter-housing-crisis>

Ylönen, U. (2019). Rakennusteollisuuden vallankumous jäi haaveeksi, Yleisradio. Saatavissa (viitattu 21.11.2019): <https://yle.fi/uutiset/3-10638320>